菇類菌絲體成型技術之應用與展望

農試所植病組 余祥萱 呂昀陞

一、前言

石化原料裂解製成之塑膠產品、保麗龍、人造纖維和橡膠製品等，自第二次世界大戰後普及全世界。由於其耐用、便宜與便利性高等因素，被廣泛應用於生活中各式家具、容器與包材中。依據統計從1950年至今，全球已累積83億噸塑料廢棄物，其中有63億噸已經不再使用。扣除可回收再利用 (9%)與被焚燒 (12%)的比例後，仍舊剩下50億噸在環境中累積 (Geyer et al., 2017)，加上石化製品無法自然分解，因而造成地球嚴重的侵害。為解決此些汙染問題，近年來世界各國皆積極鼓勵開發各類可替代性材料，因此生物性材料 (Biomaterials)或生物塑料 (Bioplastics)成為近年來新興研究課題，此類由細菌、真菌、藻類等微生物和植物所組成之材質，有別於傳統石化材料，具有可自然分解、塑形容易、環境友善且對人體無危害等優點。其中最為人所熟知的生物性材料，即為以麥稈或稻稈所製成的聚乳酸 (Poly-Lactic acid, PLA) (Karana et al., 2018)。PLA在高溫或高濕度的環境下，便能轉變成乳酸，屬於具生物可分解性的高分子材料，因此更進一步的被應用於製作醫療手術的縫線和骨釘中。此外，美國Ecovative Design公司聯合創始人E. Bayer認為真菌所產生的菌絲體具有和膠水相似的黏合能力，因此在大學時便開始著手進行相關的設計工作，最終於2007年在紐約和同學創業，正式應用真菌結合農業廢棄物形成具有支撐性的複合材料以取代利用聚苯乙烯或塑膠所製成的產品，例如傢俱中的隔熱板和3C產品的避震包材等，已分別於美國與中國申請相關專利 (Bayer and McIntyre, 2016a)，目前也和DELL和IKEA等國際品牌合作，使用Ecovative製品取代原本的發泡保護材。此種運用真菌之菌絲體纏聚植物組織後轉換成之新材質，再加工製成複合型的再生材料技術於國外稱作「Growing

作　　者：余祥萱助理研究員
連絡電話：04-23317516

Design」 (Karana et al., 2018)，在此筆者暫且譯為「菌絲體成型技術」。而在真菌中最廣為世人所利用的就屬子囊菌與擔子菌兩個亞門，因為此兩類菌中的大型真菌被稱之為菇類，而在E. Bayer等人申請的專利中，即認為具有潛力的真菌就包含鮑魚菇(*Pleurotus ostreatus*)、洋菇(*Agaricus arvensis*)、金針菇 (*Flammulina velutipes*)、簇生垂幕菇(*Hypholoma capnoides*、*H. sublaterium*)、羊肚菌(*Morchella angusticeps*)、雞腿菇(*Coprinus comatus*)、高大環柄菌(*Macrolepiota procera*)、松杉靈芝(*Ganderma tsuage*)與樺褐孔菌(*Inonotus obliquus*)等，皆屬菇類的範疇之中。我國由於菇類產業發達，致使每年會產生大量之菇類栽培後介質，如若能利用菇類栽培後介質所含有之菌絲體發展此一技術，相信未來不僅可有效去化菇類栽培後介質，還可為國內生物性材料產業開創新的契機，因此本文將針對菌絲體成型技術與其應用範圍進行介紹，並將說明此技術與菇類產業共同發展之可行性。

二、菌絲體成型技術

真菌為世界上目前已知生長最快速的生物，也被廣泛的認為是地球上最大的生物體，加上其細胞壁由牢固且堅硬的幾丁質所構成，無疑是相當具發展前景的生物性材料來源，近年來更有部分科學家認為真菌所構成之菌絲體極具潛力可於未來取代橡膠、皮革甚至是塑膠。Ecovative Design公司即是利用真菌的菌絲體開發相關包材之先驅者，在其提出此構想後，許多新創公司也以此概念為基礎陸續開發相關之模式，如舊金山的Mycoworks團隊將類似的想法應用於靈芝上，並以此製成所謂「真菌皮革」，除和動物皮革具相似質感外，更可有效控管皮革的緻密程度，使得其比動物皮革更加堅韌；另一間 MycoTecture 公司則進一步使用真菌菌絲「生長」出牆壁、拱門和圓柱以及其他建築結構的形狀 (Vasquez & Vega, 2019)；而2014年紐約的Living工作室與Ecovative Design合作，將消毒後的玉米穗軸及真菌菌種放入特殊形狀之模具中，開發出菌絲體磚塊，並利用這些磚塊於紐約P.S.1當代藝術中心院子裡，構築出約12米的高塔，使菌絲體成型之產品不單僅是取代各種家具或包材，更成為了藝術品。菌絲體成型技術所產生的再生材料被稱為「MycoComposite」，而使用不同的真菌種類，可產出具彈性、隔熱或耐震等不同特性的材質，Doutres等人也針對此些特性進行初步測試，研究結果指出由真菌所製成的再生材料可有效降低350Hz至4kHz噪音，未來有機會可替代以石化原料或合成纖維製成的傳統吸音材料(Doutres et al., 2010, Pelletier et al., 2013, Pelletier et al., 2019)。此外，近年來也有國外業者將其應用於生產如有機絕緣體(Bayer and McIntyre, 2016b)、雞蛋包裝盒、導電電路板 (Vasquez & Vega, 2019)、有機冷卻器、生物可降解的花盆、剛性防火牆、客製化家具 (Bayer et al., 2019)

或牆面 (Bayer et al., 2020)等，藉以取代目前龐大且無法分解的石化材料製品，並為環境保護貢獻一份心力。

三、菇類菌絲體成型技術發展之可行性

台灣菇類栽培最早可溯源自1909年，至今已超過百年之歷史，其中1960年代更因政府的投入與輔導，讓台灣成為世界洋菇出口第一位，並享有「洋菇王國」之美譽。時至今日，菇類產業年產值已超過百億，占整體蔬菜產值之18%，成為我國蔬菜產業不可或缺之一環(圖一)。由於菇類栽培極具商業價值，致使產業快速發展，造成國內菇類栽培太空包數量逐漸增加，每年生產量超過5億包(圖二)；若以每包1公斤計算，每年所產生之菇類栽培後介質已超過50萬公噸以上，如何處理如此龐大之栽培後介質儼然成為急需解決的產業問題。

菇類栽培後介質於國外稱為spent mushroom substrate (SMS)、菌糠或菌渣(圖三)，其主要成分與其栽培之菇種具有關聯性，但一般皆含菇類菌絲體、菇類代謝產物、栽培介質分解代謝後之殘留物與水分等。由於菇類栽培介質大多是如稻草、木屑與玉米芯等富含纖維素、半纖維素與木質素等不易分解之有機質組成，而一般菇類僅能將其中30~40%之培養基質轉化為菌絲體與菇體，仍有接近60~70%之資材處於未分解或部分分解之情況，代表依舊有大量尚未被利用之養分存在其中。此外，菇類還會產生糖類及蛋白質等物質遺留於SMS中，使其相較於原始材料更具有豐富的營養，質地也更加鬆軟。由於上述之特性，使得SMS非常具有再利用之潛力，特別是僅採收一次之菇類，如金針菇、鴻喜菇與杏鮑菇等(圖四)。目前各國對於SMS之利用也有進行相關研究，主要包含：作為菇類栽培、作物用堆肥、介質或生物製劑、禽畜飼料、燃料或生質能源、生態環境修復或酵素與多醣體萃取之材料等。其中，堆肥為台灣菇類之SMS再利用中最常見之方式，

圖一、菇類產業為台灣農業相當重要之一環。

圖二、太空包為國內最常使用的菇類栽培法。

主要是透過發酵與分解等過程，將其轉化成腐植質作為作物生長之用的養分。除上述已知的SMS再利用方式外，如能利用SMS中仍含大量活性菌絲的特點，配合上「菌絲體成型」技術，並調整菇類的生長條件及後續加工處理，研發菇類栽培剩餘資材之菌絲體成型技術，開發對環境友善且容易分解的真菌性材料，不僅不必如國外仍需額外培養真菌接種入生長基質中，達到省工及降低成本之效益，於未來也可應用於雞蛋、酒類及化妝品等包裝中，並同時為去化龐大的菇類栽培剩餘介質另闢新徑。

圖三、菇類栽培後介質(spent mushroom substrate)。

圖四、杏鮑菇。

開發菌絲體成型技術除可減少對環境的污染外，E. Bayer於TED Talk演講中也提及，由於真菌具有高適應性，因此鼓勵不同國家可依據當地情況採用在地的農業副產品做為原料，不僅可降低對進口原料的依賴，更可減少運輸成本，如在中國可選用稻殼或棉籽殼；如在北歐或北美，則可改用蕎麥或燕麥麩皮等作為培養材料。而依綠色國民所得統計107年台灣所衍生出的農業廢棄物多達510萬噸，其中有將近9成屬於生物性基質，以稻殼及稻稈為最大宗。此類廢棄物雖富含有機質與營養源且重複利用性高，但因其含水量高，占空間又不易移置等缺點，多半農民仍習慣以露天燃燒或任意丟棄的方式處置，未有標準化的集中處理流程，造成的環境髒亂和空氣污染問題日趨嚴重。現今雖已開發出諸多具潛力的廢棄物處理方式，如：作為飼料、堆肥或燃料之原料等用途，但若能將國內之農業廢棄物融合於菇類菌絲體成型技術中使用，則可有效增加材料的結構穩定性，並使菌絲體成型技術於未來應用於更廣的範疇中。

四、結語

菌絲體成型技術除具可自然分解及對人體無害等優點外，只要做得出模型，便可產生任何想製成的形狀，具有塑形容易的特點；而在使用完畢後，消費者只需將再生材

料徒手分解成較小的體積，置於家中庭園的土壤或花盆中約1個月後其即可自行降解成堆肥回歸大自然，甚至有機會改善土壤肥力。菌絲體成型技術目前雖於國內尚處於起步階段，也存在需有一定的生長時間和生產成本較高等種種挑戰，甚至仍需對此材料之特性作進一步的研究與試驗，確認如何使其可大規模製造，達到具有和塑化製品競爭的能力，但如研發成功不僅有助於解決現階段菇類廢棄太空包和農業廢棄物過剩的難題，且可降低石化原料所造成的汙染問題並提升生態價值，同時增加菇類產業的附加價值，因此實為未來值得大力推展之方向。

五、參考文獻

Bayer E, Mcintyre G, 2016a. Method for producing grown materials and products made thereby. U.S. Patent No. 9,485,917 B2.

Bayer E, Mcintyre G, 2016b. Method of growing electrically conductive tissue. U.S. Patent No. 9,253,889 B2.

Bayer E, Mcintyre G, Mueller P, et al. 2020. Methods of Generating Mycelial Scaffolds and Applications Thereof. U.S. Patent No.2020/0157506 A1.

Bayer E, Mueller P, Scully C, 2019. Method of fermenting mycelium composite material. U.S. Patent No. 10,407,675 B2.

Doutres O, Salissou Y, Atalla N, Panneton R, 2010. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. Applied acoustics 71, 506-9.

Geyer R, Jambeck JR, Law KL, 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances 3, e1700782.

Karana E, Blauwhoff D, Hultink E-J, Camere S, 2018. When the material grows: A case study on designing (with) mycelium-based materials. International Journal of Design 12.

Pelletier M, Holt G, Wanjura J, Bayer E, Mcintyre G, 2013. An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. Industrial Crops and Products 51, 480-5.

Pelletier M, Holt G, Wanjura J, et al., 2019. Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative. Industrial Crops and Products 139, 111533.

Vasquez ESL, Vega K. From plastic to biomaterials: prototyping DIY electronics with mycelium. Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers, September 9-13, 2019, 308-11.